

A vasbuca kialakulásának metallurgiai folyamatai – modellkísérletek oldalszeles kovácstűzhelyben

Matellurgical aspects of the iron bloom formation – experiments in side blast forge

Thiele Ádám¹, Hári László²

1) Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest

2) Miskolci Egyetem, Metallurgiai Intézet, Vas- és Acélmetsallurgiai Intézeti Tanszék, Miskolc

Kivonat

A cikkben egy olyan modellkísérletet mutatunk be, amelynek során oldalszeles kovácstűzbe 65-ös szegeket adagolva vasbucát hozunk létre. A kísérletek során tett megfigyelések és vételezett minták anyagvizsgálatai alapján a középkori bucaaskohászatra is érvényes megállapításokat teszünk a vasbuca kialakulásának metallurgiai viszonyaival kapcsolatban.

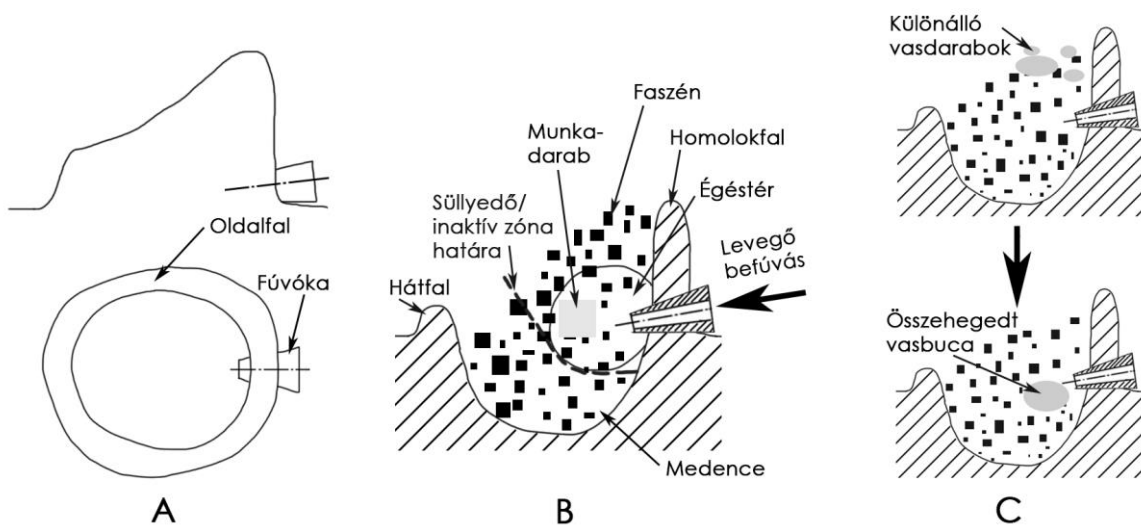
Abstract

In this paper, a model experiment is presented, in which iron bloom is extracted from small iron nails charged into a side blast charcoal fueled forge (copy of medieval forges). On the basis of the observations and material analyses of samples taken during the experiments, conclusions are drawn regarding the metallurgical aspects of the iron bloom formation during the medieval iron smelting.

1. Bevezetés

1.1. Az oldalszeles kovácstűzhely felépítése és működése

A kovácsok évezredek óta használnak oldalszeles kovácstűzhelyeket [1], angol nyelvű szakirodalomban „side blast forge” (a másik, modernebb változat az alsószeles kovácstűz, „under blast forge”). A korai oldalszeles kovácstűzhelyek tulajdonképpen egyszerű, földbe vajt gödrök voltak (ld. 1.A és 1.B ábra). A gödörben faszén izzott. A gödör pereméhez radiális irányban egy fúvókát helyeztek el, ezen keresztül juttatták be a tűz szításához szükséges levegőt. Azért, hogy az izzó faszénkupacot egyben tartsák, a gödör peremére alacsony hát-, oldal- és homlokfalazatot építettek (a falazat a fúvókához közeledve egyre magasabb volt a célszerűen fúvóka fölé halmozott faszénkupac magasságának megfelelően). A kovácstűzhely fúvósík alatti része a medence.



1. Ábra: Oldalszeles kovácstűzhely. A) oldal- és felülnézete. B) Keresztmetszete és főbb részei. C) Nagyméretű vasbuca kialakulása kisebb vasdarabokból

A fúvóka előtt egy nagyjából gömb alakú térrész volt az égéstér, itt történt a faszén égése, itt alakult ki a munkadarab hevítéséhez szükséges kellően nagy hőmérséklet. Az égéstértől távolabb már nem áll rendelkezésre elegendő oxigén a faszén elégetéséhez. Az égéstér alatt és körül inaktív, álló faszénkupac található, ez az égésteret határoló inaktív zóna nem végez mozgást a kovácstűzhely üzeme során. Az égéstér fölötti faszén viszont állandó mozgásban van, folyamatosan süllyed az égéstérben elégtő faszén helyére, így pótolni szükséges. A hevítendő munkadarabot az égéstérben helyezük el, a fúvóka orrától pár cm-es távolságban. A fúvóka és a munkadarab közötti hézagba felülről folyamatosan pótolni kell az elégtő faszenet, amelynek fűtőértéke biztosítja a munkadarab felhevülését. Az oldalszeles kovácstűzhelyre jellemző, hogy a munkadarab a hevítés során lefelé süllyed. Ez a süllyedés mindaddig folytatódik, míg a munkadarab az égéstér aljára nem ér és ott fel nem ül az inaktív zóna faszénkupacán. A korai oldalszeles kovácstűzhelyek nagy előnye a salakos bucavasak hevítésekor az volt, hogy a munkadarabból kifolyó salak lefolyt a medencébe, így nem tömítette el a fúvókát. A fúvóka alatt összegyűlt salakot természetesen időnként ki kellett takarítani a medencéből.

1.2. Vasbuca kialakulása a kovácstűzhelyben

Az oldalszeles kovácstűzhelyeket elsősorban a munkadarab felhevítésére használhatták, de a kovácsoláskor vagy egyéb módon keletkező kisebb méretű vasdarab összehegesztése egy nagyobb, ismét megmunkálható vastömbbé, azaz újrahaznosítása is lehetséges volt bennük (valamekkora veszteséggel).

Kovácsstűzhelyeket gyakran találtak középkori kohótelepek, vaskohászati műhelyek régészeti feltárásakor is, ezekre, mint újraizzító tűzhelyekre hivatkozik a szakirodalom [2]. Az újraizzító tűzhelyekben a bucakemencékből a kohósítások végén kivett vasbucákat hevítették újra, azért hogy továbbtömörítésükkel minél inkább csökkentsék a salaktartalmukat. De a kovácsfalvak kovácsműhelyekben is bizonyára ilyen felépítésű kovácstűzhelyek voltak.

Az oldalszeles kovácstűzhelyekben, egyszerű gödörtűzhelyekben azonban nemcsak a munkadarab felhevítése történhetett, hanem számos más metallurgiai eljárásnak is alapvető berendezése lehetett (pl. cementálás, téglyacél készítés – „cruciblesteel”, bronzolvasztás, stb.). Az elmúlt években végzett kutatásaink alapján feltételezzük, hogy a késő avar korban ilyen oldalszeles kovácstűzhelyekben állítottak elő nagyobb méretű, kb. 10kg tömegű ékelt vasbucákat [3]. A technológia kísérleti régészeti módszerekkel történő rekonstrukciója során kisebb méretű, 1-2kg-os, tömörített vasbucákat raktunk az izzó faszénnel teli oldalszeles kovácstűzhelybe, a faszénkupac tetejére (ld. 1.C ábra), amelyek lefelé süllyedve felmelegedtek és a fúvóka alatt-előtt egyetlen nagyobb vasbucává hegedtek össze feltételezhetően diffúziós hegedéssel. Ezt a nagyobb vasbucát aztán tovább tömörítve és ék alakban bevágva a késő avar korra jellemző nagyméretű, ékelt vasbucát is sikerült készíteni (erről videó a Youtube-on: <https://youtu.be/0GpHU572pro>). Ugyanez az eljárás, kisebb vasdarabakkal elvégezve egy alapvető újrahaznosítási technológia lehetett a múltban.

1.3. Célkitűzés

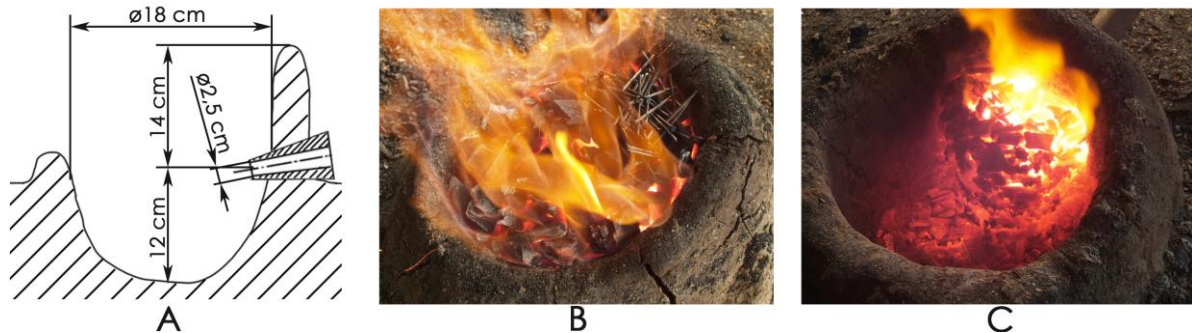
Ebben a cikkben egy olyan kísérletsorozat eredményeit szeretnénk bemutatni, amelyben kisméretű vasdarabokat, néhány gramm tömegű szegeket hegesztettünk össze egy nagyobb méretű vasbucává oldalszeles kovácstűzhelyben (a továbbiakban röviden a „szeghegesztős kísérlet” elnevezést használom). Ez egy olyan modellkísérlet, amelynek segítségével jobban megérthető, milyen metallurgiai folyamatok zajlanak le az oldalszeles kovácstűzhely fúvósíkja közelében, az így tehető megállapítások pedig kiterjeszthetők a korszakra jellemző kisméretű bucakemencékre is.

2. Módszerek és eredmények

2.1. A kísérlet leírása

Többféle kovácstűzhely kialakítással és a technológiai paraméterek (pl. befújt levegő mennyisége, faszén szemcsemérete, beadagolt szegek összömege, stb.) változtatása mellett összesen nyolc szeghegesztős kísérletet végeztünk el. Ezek egyikét ez a videó mutatja be: <https://youtu.be/9C26O82j55w>. Mivel ebben a cikkben a metallurgiai folyamatok értelmezésére fókuszálunk, az elvégzett kísérletek közül csak egyetlen reprezentatívát mutatunk be részletesen.

A kísérlet során összesen 1,2kg-nyi 65-ös szegeket (átmérő: 2,8mm, tömeg: kb. 3g) hegesztettünk össze egy földbe ásott oldalszeles kovácstűzhelyben, amelynek főbb méretei a 2.A ábrán láthatóak. A felhasznált frakcionált faszén 6-25mm-es szemcseméretű volt. A tűzhelyt 20 percig fával, majd további 20 percig már levegőbefúvás mellett faszénnel fűtöttük elő (ennek során 2,5kg-nyi faszénet használtunk fel).



2. Ábra: Szeghegesztős kísérlet oldalszeles kovácstűzhelyben. A) Méretek. B) Szegadag az izzó faszénkupac tetején. C) A fúvóka alatt-előtt összeállt salakos vasbuca a kísérlet végén.

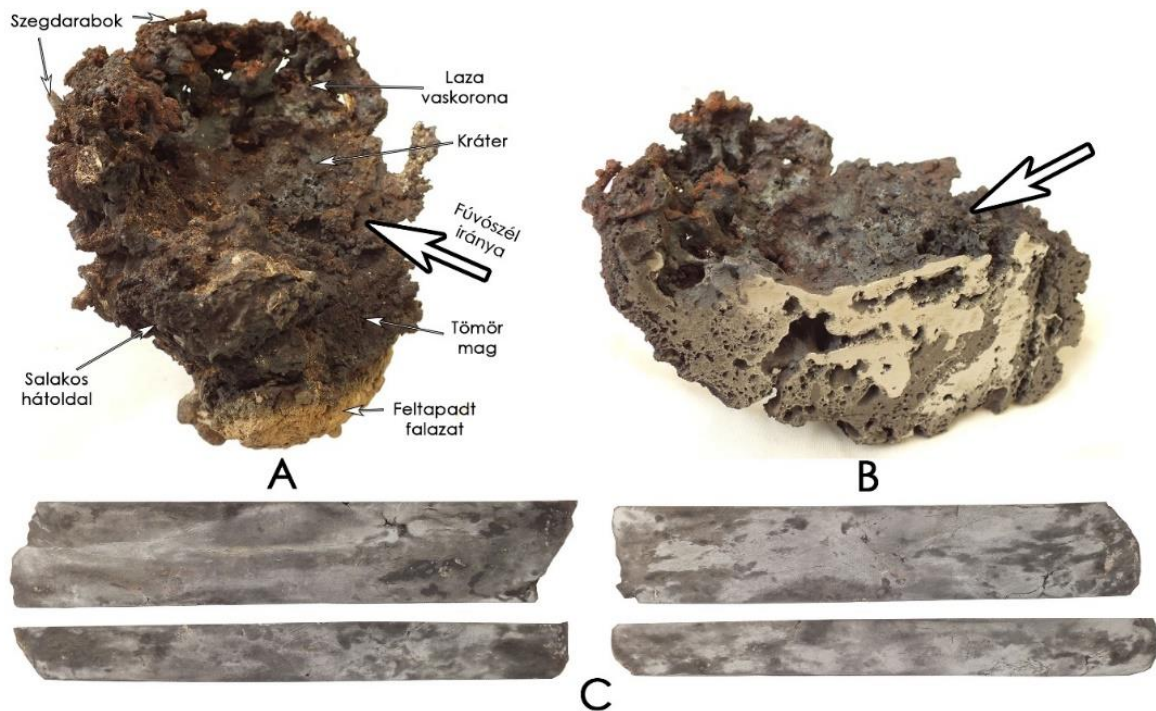
A levegőbefúvás egy kisméretű centrifugál ventilátorral történt. Az előfűtés után került az izzó faszénkupac, a süllyedő zóna tetejére, közel a homlokfalhoz (ld. 2.B ábra) az első 200g-nyi szegadag, amit fokozatosan, a süllyedésnek megfelelően faszénnel fedtünk be. Apránként adagoltuk a faszénet, összesen 400g-nyit, ez kb. 12 percig tartott. Ezután újabb 200g-nyi szeg következett, amire ismét apránként 400g-nyi faszén. Összesen 6 adag szeg és 6 adag faszén került be a tűzhelybe kb. 70 perc alatt. A befújt levegő térfogatárama a kísérlet teljes időtartama alatt kb. 50 l/perc volt. Amikor az utolsó 400g-os faszénadag elfogyott, lefújtattuk a tüzet, azaz megvártuk, míg a homlokfal előtti faszénkupac leég annyira, hogy a vasbuca kitapintható legyen (ez a fúvósík feletti kb. 5cm-es magasságot jelenti). Ezután a tűzhely inaktív zónájából kikapartuk az el nem égett faszénet, így láthatóvá téve a fúvóka alatt-előtt a falazatra feltapadt salakos vasbucát (ld. 2.C ábra). A megmaradt kb. 1 kg-nyi faszén levonásával összesen kb. 4 kg faszénet igényelt a kísérlet, amelynek időtartama összesen 150 perc volt.

2.2. Megfigyelések a vasbucán

A vasbucát ezután letörtük a falazatról és lemértük a tömegét, amely 1,41 kg volt (a beadagolt szegeken kívül a vasbucába salakként bekerült a tűzhelynek a fúvóka közelében leolvadó agyagfalazata, ill. kisebb tömegnövelő szerepe az elégett faszén hamujának is van). A vasbucán megfigyelhető volt, hogy a nagyobb tömegű, tömörebb magja a fúvóka alatt helyezkedett, a fúvósíktól kb. 8cm-es mélységig. A buca magján felül, koronaszerűen laza szerkezetű vasszivacs volt megfigyelhető, ez a szivacsosabb „vaskorona” a fúvóka orrpontjától félkör alakban kb. 6-7cm-re alakult ki 3-4 cm-es vastagságban (ld. 3.A ábra) a fúvósíktól kb. 6 cm magasságig felnyúlva. A vasbuca alsó részén egy barna sáv jelzi a tűzhely feltapadt belső falazatának a töretfelületét. A vasbucán megmaradt szegdarabok csak a korona leghátsó és legfelső részén voltak néhol megfigyelhetők. A vasbuca fúvóka előtti kráteres része sok helyütt sima, égett felületű, máshol viszont szivacsos, szemcsés a felület. A kráter alsó síkja a fúvósíkhöz képest kb. 45°-os szögben állt, a fúvósíz tehát felfelé terelődött a kráterből. A kráter felülete a kísérlet során a fúvókán keresztül egy bottal vagy vaspálcával kitapintható volt.

A vasbucát ezután félbevágtam és az egyik fél vágási felületét megcsiszoltam, ez látható a 3. B ábrán. Megfigyelhető, hogy a nagyobb vastartalmú, tömörebb rész a vasbuca tetején, a fúvóka orrpontjához közel, a fúvóka előtt-alatt található. A fúvóka orrpontjától távolodva a buca jóval salakosabb, kevesebb színtartalmú.

Ugyanezt a kísérletet ismét elvégezve a kapott vasbucát már nem hagytuk kihűlni, nem vágtuk félbe, hanem többször újrahevítettük és tömörítettük, majd vasrúddá kovácsoltuk. A vasbuca tömege itt 1,45 kg volt (a kísérlet jó megismételhetőségét jelzi az előzővel közel azonos tömeg), a kapott vasrúd pedig 0,45 kg lett, ami az 1,2kg-nyi felhasznált szeg figyelembe vételével 37,5%-os vaskihozatalt jelent.



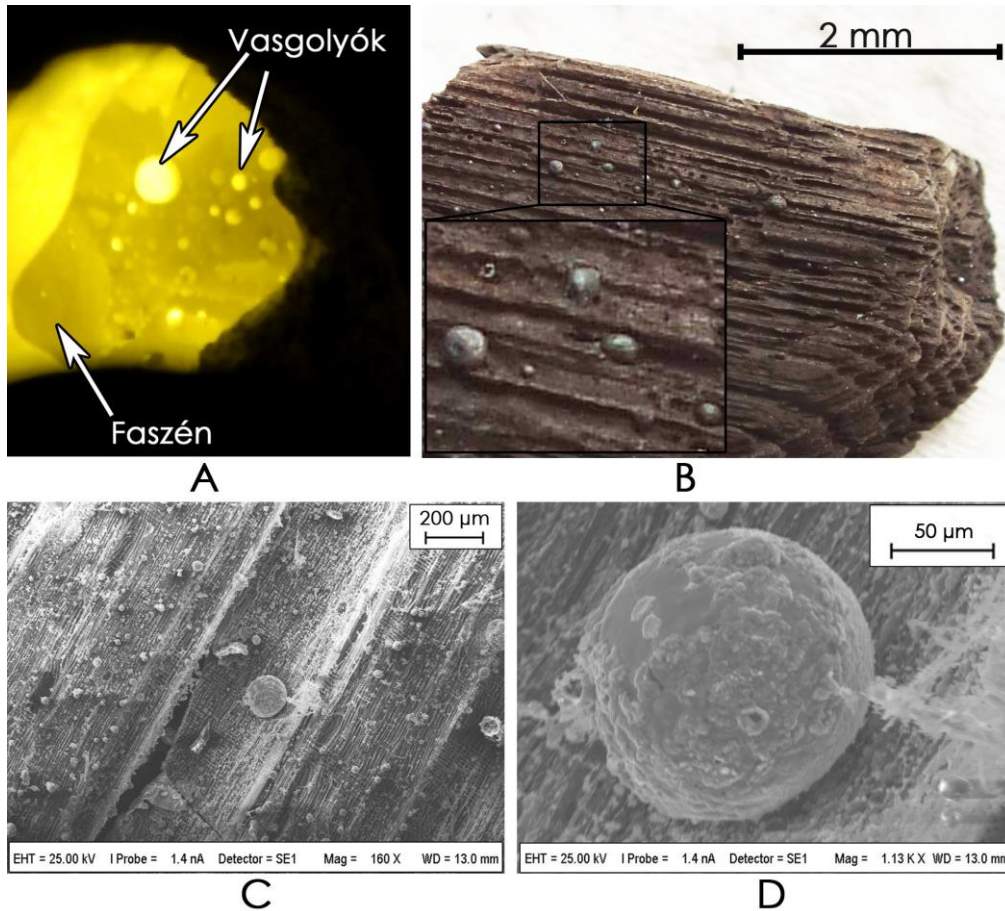
3. Ábra. A) A tűzhelyből kivett vasbuca (a nyíl a fúvósél irányát jelöli). B) A vasbuca keresztmetszete. C) A vasbucából kikovácsolt vasrúd 10%-os nitállal makromarattva. A vasrúd 140x25x16 mm-es befoglaló méretetekkel rendelkezik.

Itt térnénk ki arra, hogy egy másik kísérlet során 6-40 mm-es szemcseméretű faszénnel, 150 l/perces levegőmennyiséggel, 2,4 kg-nyi szeget 1,81 kg-os vasbucává hegesztettünk össze (itt a salak jórészt elvált a vasbucától és lefolyt a medencébe), amelyből 1,07 kg-os vastömböt kovácsoltunk ki, ami 44,6%-os vaskihozatalt jelent.

A vastömb felületét felcsiszoltam és 10%-os nitállal makromarattam a szén eloszlásának láthatóvá tétele érdekében (ld. 3.C ábra). A maratott felület alapján látható, hogy a szén eloszlása nagyon heterogén a vastömbben, megfigyelhetők jobban és kevésbé felszenült területek is. Azt tudjuk, hogy a kovácstűzbe adagolt szegek kémiai összetételüket tekintve kis széntartalmú lágyacélnak felelnek meg, így tehát megállapítható, hogy részleges cementálódás történt, a felszenülés pontos mértékét azonban a kapott vastömb átlagos széntartalmának ismerete hiányában nem lehet megállapítani. Korábban végeztünk már hasonlóan kikészített felületű, edzett hőkezeltségi állapotú bucavastömbökön HRC keménységméréseket a különböző sötétségűre maródott területeken, így az egyes mérési pontokban megbecsülhető volt a széntartalom [4]. A módszer kalibrálására GDOES mérést is végeztünk néhány pontban. Ezek alapján elmondható, hogy a maratott felület sötétebb területeinek széntartalma 0,5-1,5% körüli, a világos területeken pedig legfeljebb pár tized %-nyi szén van.

2.3. Megfigyelések a kovácstűzben

A fúvókán keresztül XTW 11-es sötétségű hegesztőüvegen keresztül benézve a fúvóka előtt, a faszéndarabokra feltapadva apró, pár tized mm-es, esetenként 1-2 mm-es, fényesen izzó vasgolyók (ld. 4.A ábra), a faszéndarabok között pedig lefelé csurgó folyékony salakcseppek voltak láthatók. Szegeket, vagy azok felismerhető darabkáit a fúvósíkból egyáltalán nem lehet látni. Jól megfigyelhető volt az egymáshoz közel kerülő vasgolyók összehegedése, rögzödése (a legnagyobb megfigyelt vasrögök kb. 5 mm-esek voltak), és a nagyobb rögök továbbgördülése a faszén felületén (erről videófilm: <https://youtu.be/GacWdCd2vPA>). A fúvókán keresztül egy vékony vascsipesszel sikerült olyan faszéndarabot kivenni a kovácstűzből, amelyeknek a felületét ilyen kis vasgolyók borították (ld. 4.B ábra). Ezek a kis vasgolyók a faszénhez csak gyengén voltak hozzátapadva, egy tű hegyével könnyedén ki lehetett őket mozdítani a helyükről. Néhány ilyen faszéndarabot elektronmikroszkóp (SEM) alatt is megvizsgáltunk (ld. 4.C és D ábra). A SEM képeken jól látható, hogy a vasgolyók teljesen gömb alakúak és többségük nagyon apró, mindössze pár tíz mikrométeres.



4. Ábra: A) A fúvókán keresztül készített hegesztőüveges fénykép. B) Faszénminta vasgolyókkal (makrofotó). C) és D) SEM képek a vasgolyókról

A kovácstűz izzó faszénkupacának tetejére adagolt szegek gyorsan felhevültek, majd lejjebb süllyedve a fúvósík közelébe a vasanyag szikrázó égése (hiccelése) is elkezdődött, a tűz lángjában apró fényes, szétágazó szikrák jelentek meg. A szikrák többsége azonban nem jutott ki a tűztérből, mivel a faszenet felülről folyamatosan pótolva az izzó, hiccelő szegeket faszénréteg fedte. A kovácstűz égésterében izzó, részben elégett, egymáshoz hegedt szegekből néhány alkalommal vascsipesszel sikerült felülről mintát venni. Az 5.A ábrán mutatott mintán látható, hogy az összehegedt szegek részben elégtek, hosszuk és átmérőjük csökkent, illetve szivacsos felrakódások figyelhetők meg rajtuk, ezek közül egyet közelről mutat az 5.B ábra. Ezek a szivacsos felrakódások alapvetően fémesek, megcsiszolva őket fémtiszta felületet kapunk, kevés salakot tartalmaznak. Egy korábbi, az acél kovácstűzbeli elégésének metallurgiai folyamatairól szóló cikkünkben már bemutattunk hasonló szivacsos felrakódásokat S235-ös anyagminőségű 10 mm-es négyzetvasak felületén [5]. A szegek égése során a felület frontális oxidációjával nagy mennyiségben keletkezik olvadt, vasoxid dús salak is, amely részben feltapad a szegekre (mint pl. ahogyan az 5.C ábrán látható), részben pedig lecsöppen (a fúvókán keresztül betekintve láthatók voltak a faszéndarabok között folyékony salaccseppek is).

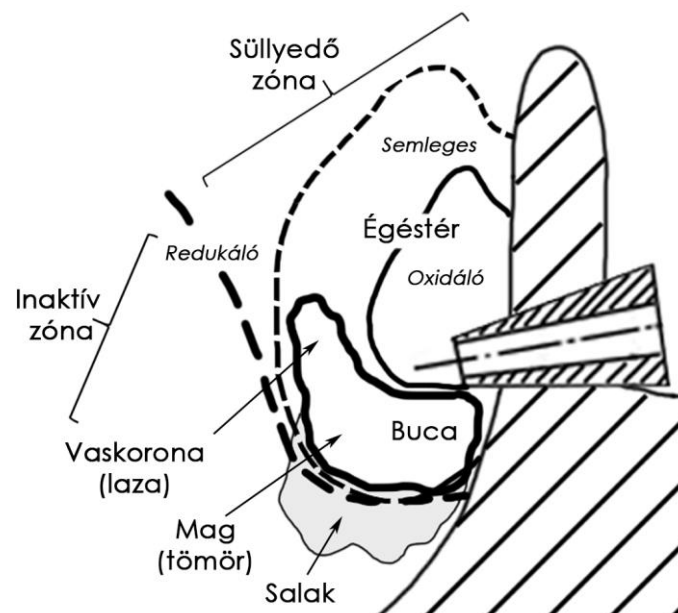


5. Ábra: A) A kovácstűz fúvósíkja fölül kivett részben elégett, összehegedt szegek. B) Szivacsos felrakódás a szegek felületén. C) Részben elsalakult szegek.

3. Értékelés

3. 1. Atmoszféraviszonyok az oldalszeles kovácstűzben

Az oldalszeles kovácstűzben a szeghegesztős kísérletek során a vasbuca kialakulásához vezető metallurgiai folyamatok értelmezéséhez mindenképp tekintsük a 6. ábrát, amely a kovácstűz atmoszféraviszonyait és a vasbuca helyzetét mutatja be. A kovácstűzben három különböző atmoszférájú térrészt különböztetünk meg. Közvetlenül a fúvóka orrpontja körül alakul ki az oxidáló atmoszférájú zóna, amelyet gyakorlati megfigyeléseink alapján úgy jellemezhetünk, hogy ebben nemcsak a faszén, hanem a vas is elég. A nagyobb kiterjedésű semleges atmoszférájú zónában a vasfázis nem ég el, de a faszén igen. Ez a két zóna alkotja a kovácstűz égésterét. Ezen kívül található a redukáló atmoszférájú zóna, amelyben már a faszén sem ég el. A redukáló atmoszférájú zónát két részre lehet osztani. Felül, elöl található a süllyedő zóna, amelyben az elegyoszlop lefelé, az égéster irányába mozog. A redukáló zóna alsó, hátsó része pedig inaktív faszénből áll, amely nem végez mozgást.



6. Ábra: Atmoszféraviszonyok és a vasbuca helyzete az oldalszeles kovácstűzben.

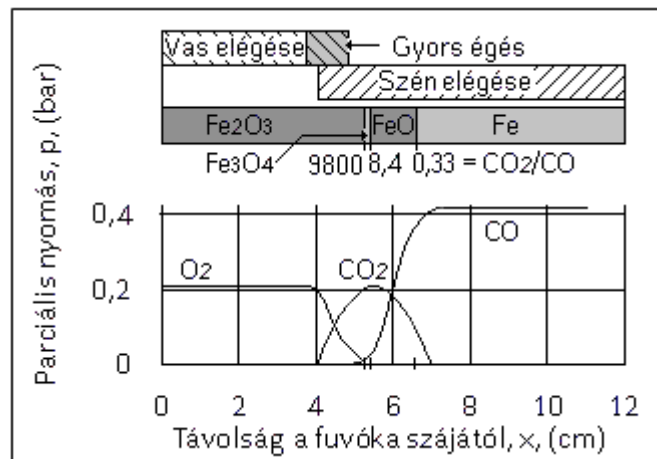
A kovácstűzben a vasbuca a fúvóka alatt, a semleges atmoszférájú zóna alsó határán kezd el kialakulni. Az eddig lesüllyedő és eléggő faszén szemcséken lévő vasgolyók és vasrögöcskék összehegedésével, növekvő vasszivacs, vasbuca jön létre, amelyhez a felülről érkező újabb faszéndarabokon lévő vasgolyók, illetve a szabadon ide hulló, korábban a vasgolyók összehegedésével kialakult nagyobb vasrögök hozzáhegednek. A növekvő vasbuca alatt a faszén az ott lévő redukáló atmoszférán nem tud elégni és egyfajta ágyazatot képez, amelyen keresztül a vasbucából a salak nagyobb része lecsurog a kovácstűzhely medencéjébe, így elválva a vasbucától. A vasbuca tömör magja közvetlenül a fúvóka

alatt helyezkedik el, a laza vaskorona pedig a semleges zónában, a fúvókától távolabb előtte és felette (ld. 6 ábra).

A vasbuca 2.2. szakaszban és a 3.A ábrán bemutatott alakjából következtethetünk arra, hogy 50 l/perces levegőtérfigatáramnál, 25mm-es fúvóka belső átmérőnél és 6-25 mm-es faszén szemcseméretnél az oxidáló atmoszférájú zóna a fúvóka orrpontjától kb. 6-7cm-es mélységig ér el vízszintesen. A kovácstűzbe tett szegek kb. a fúvóka orrpontjától 10-12 cm-es magasságban kezdenek el égni, így hozzávetőlegesen ennyi az oxidáló zóna magassága. A semleges atmoszférájú zóna kb. 10cm-es mélységére szintén a vasbuca alakjából lehet következtetni. Ezek a méretek a befűjt levegő térfogatáramának növekedésével, illetve nagyobb szemcseméretű, a légáramlást kevésbé fojtó faszén esetén nyilvánvalóan növekednek, így nagyobb méretű vasbuca tud kialakulni.

3.2. A szén és vas stabilitási viszonyai a kovácstűzben

A kovácstűz makroegyensúlyi helyzetének vizsgálata nem választható el a rendszer kémiai anyagát alkotó C, CO, CO₂, O₂ és Fe anyagok lokális koncentrációjának ismeretétől. Az ismereteket ki kell terjeszteni a hőmérsékletre is, a nyomás szerepét viszont nem hangsúlyozzuk, mivel általában 1 bar nyomású izobár rendszerekről van szó. Mint ahogy ezt fentebb láttuk, a rendszert képező gázfázis általános vegyi összetétele általában ismert, melyet a fúvóka irányának megfelelően felvett tengely hosszának függvényében célszerű vizsgálni a 7. ábrának megfelelően.



7. ábra. A fúvóka előtti tér gázainak koncentrációs viszonyai

A 7. ábra egy általános koncentráció-eloszlási képet mutat, a fúvókától felvett önkényes távolság függvényében. Az ábráról hiányzó hőmérsékletről azt kell tudni, hogy annak értéke egyrészt a távolság függvényében, másrészt a befűjt levegő térfogatáramának függvényében változik. Az előbbi összefüggésben a hőmérséklet maximumot mutat azon a helyen, ahol a CO₂-nek is maximumértéke van, másrészt a térfogatáram növelése esetén a hőmérséklet megnő, és az égés fókuszpontját jelentő CO_{2 max} értékek közelebb kerülnek a fúvóka szájához.

A rendszerben levő szilárd anyagok, mind a szén és a vas egyaránt adott esetben oxidálódnak, máskor (a redukáló viszonyok között) megőrzik elemi állapotukat. A két anyag égési feltételeire ugyanaz a három alapfeltétel együttes megléte szükséges: – az éghető anyag, – az égést biztosító közeg és az anyag gyulladási hőmérsékletét elérő hőmérséklet. A szén, vagy faszén vagy a kokszt gyulladási hőmérséklete könnyen elérhető (faszén esetében 250-280 °C). Általában ismert, hogy a fa (vagy pl. az ásványi szén) lángjelenség kíséretében ég el, amelyet a tüzelőanyagból felszabadult illóanyagok égése okoz. A faszén (és a kokszt is) az előbbieknél sokkal kevesebb illóanyagot tartalmaz, lángjelenség az átmenetileg képződő CO utánégésének köszönhető.

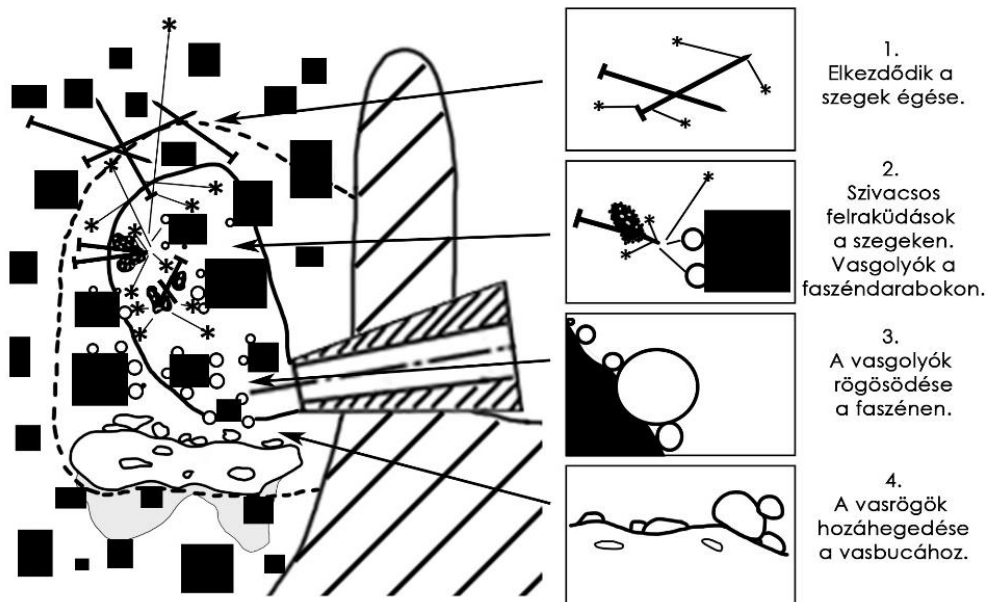
A kovácstűzhelyekben a vas gyulladása és égése már sokkal komplikáltabb. Kis széntartalmú szénacélok esetén az égés kisebb hőmérsékleteken egy lassú folyamattal kezdődik, melynek égésterméke a reve, különböző vasoxidokból áll, mely egyenletesen, néhány tized mm vastagságban bevonja a vastárgyat (frontális oxidáció). Az idő növekedésével az oxidáció sebessége parabolikusan, a hőmérséklet

növelésével pedig exponenciálisan nő és növekvő mértékben kiterjed a felület közeli szemcsehatárokra is (intergranuláris oxidáció). Az égés sebessége az oxigén koncentrációjával arányosan nő, eltekintve az exoterm folyamat hőmérsékletnövelő hatásától. A fehérizzás kb. 1350°C-os hőmérsékletén indul meg a szikraképződéssel járó ún. hiccelési folyamat. A jelenség megértése szempontjából fontos tudni, hogy a reve két fő alkotója a vasoxidul (FeO) 1377°C-on olvad, a magnetit (Fe_3O_4) pedig 1597 °C-on. A wüsztit-magnetit fázisokból álló reve a fehérizzáson megolvad, a feloxidálódott szemcsehatárokon megjelenő olvadt reve hatására a felület közeli szemcsék szikrázva kilökődnek a munkadarabból, elkezdődik a hiccelés, a munkadarab gyors, szikrázó égése.

A 7. ábrát vizsgálva megállapíthatjuk, hogy a kovácstűzhelybe benyúló vastárgy lassú oxidációjának megvannak a feltételei, ugyanis a revésedés kezdeti hőmérséklete kb. 600 °C. A lassú oxidáció mindaddig tart, amíg O_2 van a rendszerben. Ebből a szempontból a CO_2 oxidáló hatása már nagyságrenddel kisebb. Az ábra szerint a vastárgy gyors oxidációja azon a helyen várható, ahol az oxigéntartalom még nagy és a hőmérséklet már eléggé nagy, vagyis valahol az O_2 -- CO_2 gázelegy közös területén. A fúvóka tengelye mentén a fúvóka szájnyílásától távolodva a rendszerben megjelenik először a CO_2 és utána fokozatosan a CO . A két gáz arányától függően az Fe_3O_4 , majd az FeO , végül az Fe fázis lesz a termodinamikailag stabil anyag. Az itt nem részletezett számítások eredményei alapján megállapítható, - és ez a 7. ábrán is megfigyelhető, - hogy 1200 °C-on a színvas stabilizálásához 0,33-nál kisebb CO_2/CO arány szükséges, a wüsztitéhez 8,4, a magnetitéhez pedig 9800, ami egyébként megfelel a közismert Fe-O-C rendszer 1200 °C-os hőmérsékletéhez tartozó egyensúlyi vonalairól leolvasható 25% CO_2 -75 % CO ; 89,4 % CO_2 – 10,6 % CO valamint 99,888 CO_2 – 0,012 % CO értékeknek [6].

3.3. A vasbuca kialakulásának metallurgiai folyamatai az oldalszeles kovácstűzben

A metallurgiai folyamatok értelmezéséhez, azaz a vasbuca szegekből történő kialakulásának megmagyarázásához tekintsük a 8. ábrát, amely a kovácstűzbe beadott szegek útját mutatja a vasbuca kialakulásáig. Az izzó faszénkupac tetejére rakott vékony szegek hevülni kezdenek, majd lejjebb süllyedve, beérve az oxidáló atmoszférájú zónába, égni kezdenek (ezt mutatja a 7. ábra 1. kisképe). Az égő szegek szikrákat vetnek ki, hiccelnek. A szikrák valójában kilövellő vasszemcsékből állnak, amelyek valamennyi olvadt, nagy vasoxid-tartalmú salakot is tartalmaznak (részletesen ld. Thiele et al 2020).



8. Ábra. A szeghegesztős kísérlet főbb metallurgiai folyamatai.

A szegekből kilépő szikrák útja három féle lehet (ld. a 8. ábra 2. kisképe). Kirepülhetnek a kovácstűzből és égésük során teljesen elsalakulnak. Ilyenkor magnetit golyócskák keletkeznek belőlük, ilyeneket mutattunk be egy korábbi cikkünkben [4]. A másik lehetőség, hogy rövid időre felrakódnak magukra a

szegekre (azok kisebb hőmérsékletű és/vagy kevésbé oxidáló atmoszférán lévő részére), ilyenkor alakulnak ki a korábban tárgyalt szivacsos, fémes-salakos felrakódások (ld. pl. az 5.B ábrán), amelyek végül újra hiccelve elégnék (esetleg a nagyobb méretűek, kisebb fajlagos felületüknél fogva megúszhatják a teljes újra elégést és egyfajta tixomoldingként lecsöppenhetnek a vasbucára). A harmadik lehetőség, hogy a szikrák a faszéNDARABOK felületére tapadnak fel. Ilyenkor a szikrákban lévő vasszemcsék égése folytán zajló elsalakulása leáll, a faszén felületén feltapadva haladnak tovább lefelé. Tulajdonképpen tehát a szegek elégésével keletkező szikrák végül szinte mind a faszéNDARABOK felületén gyűlnek össze és elenyésző részük jut csak ki a kovácstűzből (erre utal az, hogy a beadott szegek össztömegénél nemhogy kisebb, de valamennyivel nagyobb tömegű vasbucák keletkeztek). Itt kell megjegyezni, hogy a vasfázis égése a kovácstűzben nyilvánvalóan nem jár teljes elsalakulással, tehát a vasfázis nem ég el teljes mennyiségében vasoxiddá, ugyanis a kísérletek során mindig kaptunk jobb-rosszabb vaskihozattal vasbucát. Azonban a nagy fajlagos felületű szegek teljes térfogatukban szikrákká égnek el (elhiccelnek), erre utal az, hogy a vasbucákban szegeket, szegdarabokat csak a vaskorona legfelső, leghátsó részén lehetett néha látni, ahol az atmoszféra- és a hőmérsékletviszonyok nem kedveztek a szegek teljes elégésének (érdekes lenne a kísérletet elvégezni kisebb fajlagos felületű vasdarabakkal is, amelyek nem hiccelnének el teljes térfogatukban). A szegek elégése során nemcsak szikrák lökődnek ki, hanem a felületük frontális oxidációja révén sok folyékony, vasoxid dús salak is keletkezik (ilyen jórészt elsalakult szegek láthatók az 5.C ábrán). Ez a salak nagy hőmérsékleten körbe folyja a felületet, majd elválik tőle és a faszéNDARABOK között lefelé csöpög. Megfigyeléseink alapján feltételezzük, hogy ennek az olvadt, vasoxid-dús salaknak a színvassá történő visszaredukálódására sem a faszén felületén, sem pedig az atmoszféra által (sem direkt, sem indirekt módon) sincs nagy volumenben lehetőség.

A faszén felületére került vasanyag, a vasgolyócskák tehát mintegy „megmenekülnek” a teljes elsalakulástól (ezt mutatja a 7. ábra 3. kisképe), sőt a faszén felületére jutott szikrák vasoxid tartalma visszaredukálódik színvassá (erről a folyamatról részletesebben a 3.3. szakaszban). Ezekből a kis vasgolyócskákból fog tudni összeállni maga a vasbuca. Ahogyan a faszén ég, csökken a felülete, így a rajta lévő vasgolyók egyre közelebb kerülnek egymáshoz. A faszén felületén így a vasgolyók egyesülnek, növekszenek, rögződnek. Ha egy vasrög kellően nagyra nő, a súlyánál fogva elválik a faszéntől és leesik (erre látunk több példát ennek a videónak az első másodperceiben: <https://youtu.be/GacWdCd2vPA>) és hozzáheged a vasbuca felületéhez, mégpedig abban a 3.A ábrán bemutatott kráterben, amelyet a hegedést elősegítő olvadt salakfilm borít. A faszéNDARABOK teljes elégése folytán végül minden vasgolyó a növekvő vasbucához heged, ezt szemlélteti a 7. ábra 4. kisképe.

A vasbuca magja és koronája között mutatkozó jelentős sűrűségkülönbség oka mindezek alapján feltételezhetően a következő. A fúvóka közelében, az oxidáló atmoszférában a faszénszemcsék felületén lévő vasgolyók égésük folytán folyékony halmazállapotban hegednek hozzá a szilárd halmazállapotú, növekvő bucamaghoz, amely így sokkal tömörebb lesz (a felrakó hegesztés technológiájával lenne itt párhuzam vonható). Viszont a fúvókától orrpontjától távolabb, a semleges atmoszférájú térrészben süllyedő vasgolyók nem égnek (de az atmoszféraviszonyoknak megfelelően nem is szenülnek), így szilárd halmazállapotban diffúziós hegedéssel hegednek össze, így építve fel a sokkal lazább vaskoronát. A sűrűségkülönbség másik oka az lehet, hogy az oxidáló zónában a vasfázis részben elsalakul, így a buca magjába több salak kerül, ami segíti a vasgolyócskák, rögcskék összehegedését.

3.4. Metallurgiai folyamatok a vasgolyócskák, a faszén és az atmoszféra között

Az eddig elmondottak és a megfigyeléseink alapján úgy véljük, hogy a vasbuca kialakulásában kulcsszerepe van a faszén felületén megfigyelt kis vasgolyócskáknak. Metallurgiai szempontból fontos kérdés, hogy ezek szilárd vagy folyékony halmazállapotúak? A folyékony halmazállapotra utal egyrészt a tökéletes gömb alakjuk, másrészt a hegesztőüvegen át látott színhőmérsékletük (ld. 4. ábra). Egy rövid számítással is igazoljuk feltevésünk helytállóságát, amellyel bemutatjuk, hogy az egységnyi tömegű vas oxidációja révén felszabadult hőmennyiség többszöröse az ugyanolyan tömegű vasnak pl.

az 1200 °C-os aktuális hőmérsékletről az olvadáspontig, és onnan az 1600 °C-ra való felhevítéséhez szükséges hőnek. Ez a q arány a következő:

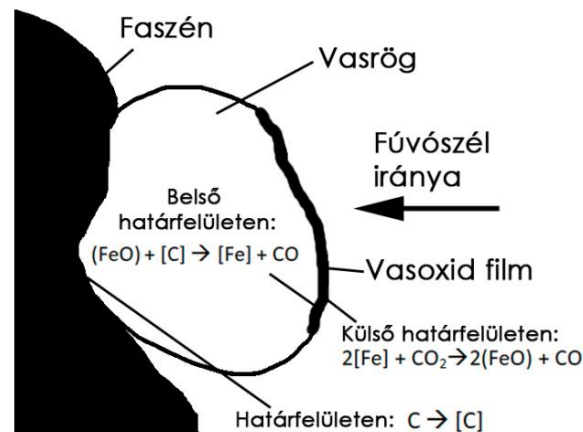
$$q = \frac{\Delta H_k}{c_{p\ sz}*(1536-1200)+\Delta H_{olv}+c_{p\ olv}*(1600-1536)} \quad (1)$$

ahol ΔH_k és ΔH_{olv} az FeO moláris képződéshője ill. olvadáshője, $c_{p\ sz}$ és $c_{p\ olv}$ a szilárd és az olvadt vas moláris fajhője.

$$q = \frac{264\ 850\ J/mol}{35,2*(1536-1200)+13\ 580+46,6*(1600-1536)\ J/mol} = 9,2 \quad (2)$$

1 mól, vagy 1 kg vas oxidációja során képződő hőmennyiség tehát kb. 9-szer több, mint ami az 1200°C-ra előmelegített vas megolvasztásához szükséges. Amennyiben a számítást a 0 °C kiinduló állapotból számítva megismételjük, a többlet hőmennyiség relatív értéke 3,2. Természetesen, némi magnetit megjelenés módosítja az eredményeket.

Tehát bár a kovácstűzhelyben kialakuló vasbuca szilárd halmazállapotú, a hozzá hegedő vasgolyók folyékonyak és a hegedést megelőzően néhány tíz másodpercet, de akár perceket is eltöltenek folyékony halmazállapotban. Feltételezzük, hogy a folyékony halmazállapotot a faszénszemcsék között áramló oxidáló atmoszférában a vasszén erősen exoterm égésével termelődő hő tartja fent, a vasszén égésével keletkező szintén folyékony vasoxid viszont folyamatosan vissza is redukálódik szénvassá, a redukciót pedig a folyékony vasszén faszénből felvett széntartalma teszi lehetővé. Ezt szemlélteti a 9. ábra. (A vasszén széntartalmának a vasoxid-dús salakra gyakorolt redukáló hatása figyelhető meg ebben a videóban: <https://youtu.be/WGvC8uxPCow>, a videó elején egy salakcsepp elválik és lecseppen az égő munkadarab felületéről, a videó második felében viszont a következő salakcsepp „visszaszívódik” a szivacsos felrakódásra.)



9. Ábra: A faszén felületén lévő vasgolyókhoz köthető metallurgiai folyamatok

A felvázolt metallurgiai folyamatok alapján azt is feltételezhetjük, hogy a vasgolyócskák széntartalma nagyon alacsony (semmi képpen sem nyersvas cseppecskékről, hanem acélcseppecskékről van szó), mert a szabad, faszénnel nem érintkező felületüket vasoxid borítja, amely folyamatosan dekarbonizál. Ha egy vasgolyócska szabad felülete kevésbé oxidáló, esetleg redukáló atmoszférába kerül, akkor természetesen megindul a cementálódása, azonban ilyenkor az égés megszűnésével feltételezhetően a vasgolyócska halmazállapota szilárd lesz (amikor például a 4.B ábrán bemutatott minták vételezése miatt a levegőbe fúvást pár másodpercre szüneteltetni kellett, megfigyelhető volt, hogy az addigi színhőmérsékleti különbség a faszén és a vasgolyók között megszűnik, és a vasgolyók a faszénnel azonos hőmérsékletűvé válnak, és feltételezhetően meg is szilárdulnak). Mivel a kovácstűz égésterében meglehetősen sztochasztikus viszonyok között süllyednek a faszén felületére feltapadt vasgolyócskák (pl. bizonyára vannak olyanok is, amelyek kevésbé oxidáló atmoszférában, pl. „fúvósél-árnyékban” haladnak), így már a vasbucához hegedés előtt különböző széntartalomúakká válnak (magában a növekvő vasbucában is végbemehetnek dekarbonizációs-cementációs folyamatok, de

ezeknek a kis fajlagos felület már nem kedvez). Alapvetően ezzel magyarázható a vasbucában a heterogén széneloszlás, amit a 3.C. ábra mutat.

4. Összegzés, következtetések

A szeghegesztős kísérletek legfontosabb eredménye a vasbuca kialakulásának mechanizmusával kapcsolatosak:

- A vasbuca kovácstűzbeli elhelyezkedésére jellemző, hogy a fúvóka alatti semleges atmoszférájú zóna alsó részén az el nem égő faszénágyon ül fel. A vasbuca szerkezetére jellemző, hogy a fúvóka alatti mag része tömör, a fúvókától a vízszintes síkban körkörösén távolabb első és a magasabban lévő vaskorona része viszont laza szerkezetű. Közvetlenül a fúvóka orrpontja előtt-alatt a vasbucának van egy nagyjából sík, kráteres felülete, amit az oxidáló atmoszférájú zóna alsó része határol.
- A kovácstűzbe adagolt szegek teljes térfogatukban elhiccelnek: részben elsalakulnak, részben pedig fémes vasat tartalmazó szikrák lövellenek ki belőlük.
- A szegek égésekor kilövellő szikrák a faszén felületén összegyűlnek, szabályos gömb alakú vasgolyókat alkotnak, a faszén eléégésével csökkenő felület miatt egymáshoz közeledve rögzösödni kezdenek, majd egy bizonyos méretet elérve a szilárd vasbucára esnek, és ahhoz hozzáhegednek.
- Színhőmérsékletük és tökéletes gömb alakjuk miatt feltételezzük, hogy a faszén felületén megfigyelt vasgolyók folyékony halmazállapotúak.
- A kísérletek során a technológiai paramétereiktől függően kb. 35-45%-os vaskihozatal volt elérhető).

Irodalom:

- [1] Pleiner R. 2006: Iron in Archaeology - Early European Blacksmiths, Praha, AU AVČR
- [2] Gömöri J. 2000: Az Avar kori és Árpád-kori vaskohászat régészeti emlékei Pannóniában, Kiadja a Soproni Múzeum Régészeti Gyűjteménye és az MTA VEAB Iparrégészeti és Archeometriai Munkabizottsága, Sopron.
- [3] Török B., Barkóczy P., Kovács Á., Költő L., Fehér A., Szőke B. M. 2018: Pannóniai kora középkori ékelt vasbucák összehasonlító archeometriai vizsgálata, BKL – Kohászat, vol151/3, pp. 1-3
- [4] Thiele Á., Török B. 2022: A possible medieval recycling technique – smelting iron using hammerscale, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol 1246, 012008
- [5] Thiele Á. Hári L., Magyar D. 2020: Az acél kovácstűzbeli eléégésének metallurgiai háttere – damaszkolt anyagokon kialakuló felületi hibák magyarázata, Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat 153(5), pp. 4-9.
- [6] Óvári A. 1985: Vaskohászati kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, p. 83